

ТУННЕЛИРОВАНИЕ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В КОНТАКТАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА НИОБИЯ

Г.П. Мотулевич, Д.Р. Джураев, Е.А. Антонова, В.А. Сухов

Для туннельных контактов NbN-I-Pb и NbN-I-Ag (I-окись Nb) в интервале напряжений $V - (\Delta_{\text{NbN}} + \Delta_{\text{Pb}}) / e = 0 \div 30$ мэВ и $V - \Delta_{\text{NbN}} / e = 0 \div 31$ мэВ соответственно (Δ_{NbN} и Δ_{Pb} — сверхпроводящие энергетические щели) исследованы зависимости $\sigma_{\text{ч}}(V)$ и $d\sigma_{\text{ч}}(V) / dV$, где $\sigma_{\text{ч}}$ — четная часть проводимости туннельного контакта. В интервале энергий $0 \div 26$ мэВ определены положения максимумов функции электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ).

Исследование туннелирования электронов в системах S-I-N и S-I-S (S — сверхпроводник, N — нормальный металл, I — изолятор) позволяет получить информацию об ЭФВ в сверхпроводящих электродах¹. Обычный упругий одночастичный ток, а также неупругая часть тока дают вклад в $\sigma_{\text{ч}}(V)$; многочастичные эффекты, как собственно энергетические, так и „интерференционные“ (связанные с неортогональностью упругого и неупругого процессов) — в $\sigma_{\text{нч}}$ ($\sigma_{\text{нч}}$ — нечетная часть). Выделение $\sigma_{\text{ч}}$ позволяет исключить влияние этих многочастичных процессов². Для контактов S-I-N энергии минимумов упругой части $d\sigma_{\text{ч}} / dV$ совпадают с энергиями максимумов ЭФВ. Для контактов S-I-S такого простого соотношения нет. Однако, в случае, когда максимумы ЭФВ обоих сверхпроводников разнесены, указанное выше соотношение приблизительно выполняется. Преимущество S-I-S контактов — существенно большая величина эффекта. Для неупругой части туннельного тока $d\sigma_{\text{ч}} / dV > 0$ и максимумам плотности фононных состояний или колебаний примесей соответствуют максимумы $d\sigma_{\text{ч}} / dV$. Таким образом, если $\min d\sigma_{\text{ч}} / dV < 0$, то он может быть связан только с обычным упругим туннелированием и его положение определяет энергию максимума ЭФВ. Обратное утверждение может быть неверным из-за увеличения прозрачности барьера с ростом V .

В работе приводятся результаты исследования $\sigma_{\text{ч}}(V)$ и $d\sigma_{\text{ч}} / dV$ туннельных контактов Nb-I-Pb и NbN-I-Ag (I-окись Nb).

Пленки NbN изготавливались методом реактивного катодного напыления³. После экспозиции пленки на воздухе в течение $10 \div 720$ часов наносился второй электрод. Площадь туннельного контакта составляла $1,0 \times 0,1$ мм², сопротивление $R = 0,7 \div 8,7$ Ом. При температуре $T = 1,9$ К измерялись $I - V$ характеристики (I — туннельный ток) и dV/dI . Значения dV/dI оборачивались и сглаживались, после чего вычислялись $\sigma_{\text{ч}} \equiv (dI / dV)_{\text{ч}}$ и $d\sigma_{\text{ч}} / dV$. Все вычисления выполнялись на ЭВМ WANG2200.

Был изготовлен ряд туннельных контактов. Из них отобраны два контакта: один — NbN-I-Pb, другой NbN-I-Ag, обладающих наиболее высокими сверхпроводящими параметрами

пленки NbN и характеризующиеся наличием только одной сверхпроводящей щели у пленки NbN¹⁾. Параметры пленок NbN контактов NbN-Pb и NbN-Ag соответственно равнялись: $T_c = 15,6$ К и $T_c = 14,6$ К, $\Delta = 2,9$ мэВ и $\Delta = 2,6$ мэВ, $R = 8,7$ Ом и $R = 1,5$ Ом. Здесь T_c — температура сверхпроводящего перехода, определенная по середине скачка сопротивления. Указанные контакты многократно измерялись и обрабатывались по алгоритму, приведенному выше. Результаты всех измерений, относящихся к каждому образцу, усреднялись.

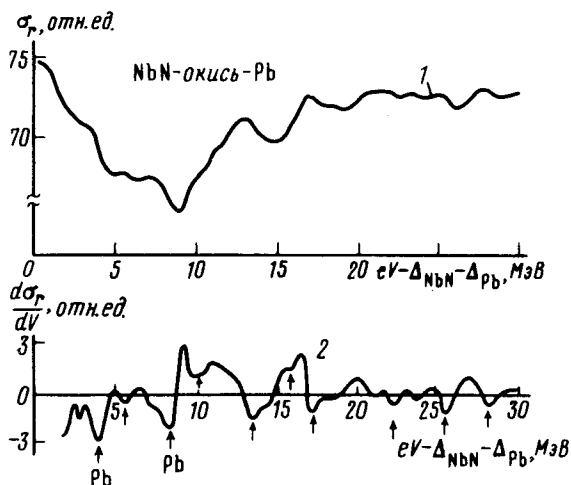


Рис.1. Контакт NbN-I-Pb: $T = 1,9$ К, $1 - \sigma_q(V)$, $2 - d\sigma_q(V)/dV$

На рис.1 и рис.2 приведены зависимости $\sigma_q(V)$ и $d\sigma_q(V)/dV$ для обоих контактов. Рис.1 относится к контакту NbN-Pb. Отсчет по оси абсцисс для каждой полярности делался от суммы щелей $\Delta_{NbN} + \Delta_{Pb}$. Рис.2 относится к NbN-Ag. Отсчет по оси абсцисс для каждой полярности делался от щели Δ_{NbN} . Вводилась поправка на смещение положения максимума dI/dV относительно Δ_{NbN} , рассчитанная по методу работы⁴. Положение Δ_{NbN} для обеих полярностей указано на рис.3. Нормировать σ_q на соответствующие значения проводимости для нормального металла не удастся, поскольку в нормальном состоянии сопротивление пленки NbN много больше сопротивления туннельного контакта. Из рис.1 и рис.2 видно, что для функции $d\sigma_q/dV$ наблюдается сложная структура, содержащая ряд минимумов. Основные минимумы на рисунках отмечены стрелками. Соответствующие им энергии приводятся в таблице. Аналогичная картина наблюдалась и для других контактов. Отклонение положения минимумов от приведенных в таблице составляло от десятых до одного мэВ. Разброс связан, по-видимому, с разной структурой пленок, которая приводит не только к смещению минимумов, но и к изменению сверхпроводящих параметров.

Для расшифровки полученных особенностей необходима дополнительная информация. NbN обладает структурой типа NaCl, содержащей 2 атома в электронной ячейке. Его фоннный спектр содержит 3 акустические и 3 оптические ветви. В настоящее время нам не известны какие-либо опубликованные данные ни для нейтронных измерений плотности фоннных состояний NbN, ни для соответствующих туннельных исследований. В качестве первой ориентировки можно использовать данные, полученные для Nb. В работе Шарпа⁵ выполнены нейтронные исследования плотности фоннных состояний в Nb. Квазипродольная ветвь имеет максимум при 23,7 мэВ, квазипоперечные ветви имеют 2 максимума: широкий в области $18,1 \div 21$ мэВ и более узкий при 16,1 мэВ. В туннельных исследованиях Веденева, Голяминой, Погребнякова⁶ получены для энергии основных максимумов функции ЭФВ значения $21 \div 23,5$ мэВ и $15,5 \div 16,7$ мэВ, и, кроме того, 2 низкочастотных максимума в областях $6,0 \div 6,3$ мэВ и $9,5 \div$

¹⁾ В ряде случаев пленки NbN, с высокими T_c , показывали наличие двух щелей. Такие пленки не использовались.

$\div 10,5$ мэВ. Указанным максимумам соответствуют минимумы d^2I/dV^2 . Можно ожидать, что примерно в этой же области будут максимумы функции ЭФВ и для акустических ветвей NbN. Что касается оптических ветвей, то никаких указаний на соответствующий им интервал энергий мы не имеем. Мы полагаем, что в интервале $0 \div 24$ мэВ основные минимумы $d\sigma_{\text{ч}}/dV$ для контакта NbN-Ag определяют максимумы ЭФВ акустических ветвей NbN. Данные для контакта NbN-Pb согласуются с этими результатами. Ошибка может быть оценена по разбросу полученных значений для разных образцов. Она указана выше.

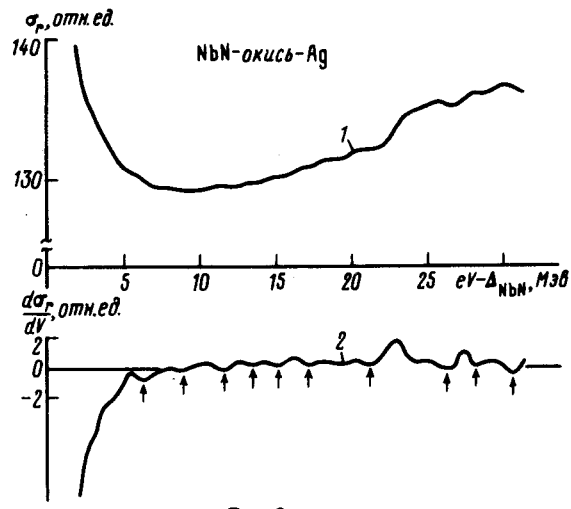


Рис.2

Рис.2. Контакт NbN-I-Ag: $T = 1,9$ К, 1 - $\sigma_{\text{ч}}(V)$, 2 - $d\sigma_{\text{ч}}(V)/dV$

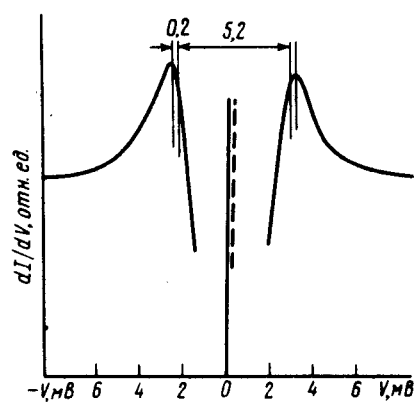


Рис.3

Рис.3. Поправка на смещение максимума проводимости σ относительно положения Δ_{NbN} для обеих полярностей в случае контакта NbN-I-Ag. Поправка вводилась согласно работе ⁴. Знак V соответствует полярности Ag.

Положения минимумов функции $d\sigma_{\text{ч}}(V)/dV$, мэВ.

Номер п.п.	NbN-Pb	NbN-Ag	Номер п.п.	NbN-Pb	NbN-Ag
1	4,0	-	7	15,8	15,0
2	5,6	6,2	8	17,2	17
3	8,4	-	9	21 \div 23,6	21
4	} 9,8 -10,6	8,8	10	25,4	26,2
5		11,5	11	28,0	28,2
6	13,4 -14,4	13,4	12	—	30,5

Как следует из рис.2 и таблицы NbN имеет 3 мягкие моды с энергиями 6,2; 8,8 и 11,5 мэВ. Наличие мягких мод подтверждается также результатами исследования контакта NbN-Pb, но положения соответствующих особенностей несколько искажены наличием сильных особенностей, связанных с Pb. Далее наблюдаются минимумы $d\sigma_{\text{ч}}/dV$ при энергиях 13,3; 15; 17 и 21 мэВ. Соответствующие им минимумы наблюдаются также и для контакта NbN-Pb. Что касается структуры $d\sigma_{\text{ч}}/dV$ при $V > 24$ мэВ, то для расшифровки ее нужны дополнительные данные.

Литература

1. Rowell J.M., McMillan W.L., Feldmann W.L. Phys. Rev., 1969, 180, 658.
 2. Иванченко Ю.М., Медведев Ю.В., ФНТ, 1976, 2, 141; Иванченко Ю.М., Кочергин Е.В., Медведев Ю.В. Укр. физич. журнал, 1974, 19, 1497.

3. Антонова Е.А., Сухов В.А. ФНТ, 1981, 7, 1002.
4. Pike G.E. J. Appl. Phys., 1971, 42, 883.
5. Sharp R.J. J. Phys. C, ser 2, 1969, 2, 421.
6. Веденеев С.И., Голямина Е.М., Погребняков А.В. ФТТ, 1981, 23, 938.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР
Московский институт стали и сплавов

Поступила в редакцию
3 мая 1982 г.
После переработки
27 сентября 1982 г.